

水听器线列阵近场声压测量误差实验研究 *

楼红伟 姜俊奇 何祚镛

(哈尔滨工程大学水声工程系 哈尔滨 150001)

2000 年 6 月 15 日收到

摘要 本文介绍用于近场声压的测量水听器阵中阵元水听器测量声压的可靠性检验方法和实验结果。提出阵元水听器测量球面波场中声传播衰减曲线与理想球面波声场中声传播衰减曲线对比的检验方法;采用了球面声源声中心测量值对收发距离进行修正的方法;实验水池中对线列阵上十元水听器在球形声源水池中进行了传播衰减曲线的测量分析;验证了基阵的弱散射性能。表明线阵可用于距离小至 $1/7$ 波长的极近场的扫描测量。

关键词 水下声压测量, 线列阵, 近场声传播

Experimental study on the measurement error of sound pressure for linear element hydrophone in near field

Lou Hongwei Jiang Junqi He Zuoyong

(Underwater Acoustic Dept., Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract This work is to present a method to verify the reliability of the device for the measurement of pressure in near field. We put forward the verifying method of comparing the transmitting attenuation curves in the spherical field measured by the element hydrophone with that in an ideal spherical field. The distance between the source and the hydrophone is revised by the spherical source's center computed by least-squares fit. Trait of weak scattering field is established. So we arrive at the conclusion that this device can scan an extremely near field of range less than one-seventh wavelength.

Key words Underwater acoustic pressure measurement, Linear element array, Sound transmission in near field

1 引言

近年发展的声全息测量,要求对声场中各点声场的幅值和相位进行准确地测量。同时,由于场中测量点很多,所以单水听器测量费时

很多。为了提高声场全息测量的效率,哈尔滨工程大学水声研究所开发了用水听器线列阵在声场中进行大面积自控扫描数据采集的方法。实践证明这种方法是很有效的。但是,由于水听器阵受基阵架及水听器之间声散射的相互影

* 国防“九五”计量项目资助

响,使得接收极近场声信号与原来声场有较大失真。以前所做的双水听器水声声强测量线列阵,其整个阵架虽然采用有机玻璃板做成,水听器镶嵌在板中,但对距源小于 30cm 近场测量仍有一定影响^[1]。而对于近场声全息场变换工作,在极近场测量可以提高场重建的准确度。为了减小水听器基阵架对近场声的影响,对基阵架的结构设计,应当进一步改进。

新研制的实验基阵架由有机玻璃块、辐条(直径 2mm)和由铜管弯成的支架组成,有机玻璃块中孔,置放水听器,见图 1。选用了 10 个振幅和相位一致性很好的水听器组成线列阵,玻璃块用橡胶块定位以保证阵元之间等距离,水听器线阵的两端和其电缆由一弓形支架支撑,在它们的垂心线上垂吊重物以保持在水中处于垂直状态,如图 2 所示。考虑到金属管和金属丝的声散射对水听器所处声场的影响,金属管中灌以 703 胶,管外用热缩塑料套管套装起来,以减少声散射。相邻水听器之间距离均为 6cm,因而整个阵的有效长度为 54cm。实验时接收阵由加长管垂直放入水池中适当深度。

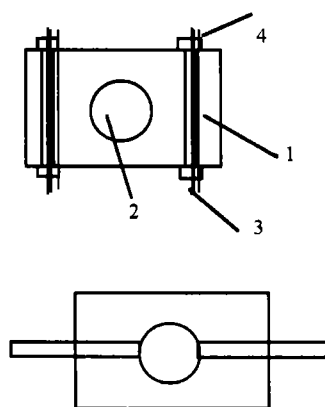


图 1 单个水听器固定结构示意图

- 1- 有机玻璃块; 2- 水听器安置孔;
3- 悬挂丝杆; 4- 定位橡皮。

为了检验所研制的 10 元水听器接收基阵架对复数声压测量的影响,以及接收基阵的扫描灵活性和运行可靠性,在我校水声所实验水池中进行了水声测量实验研究。

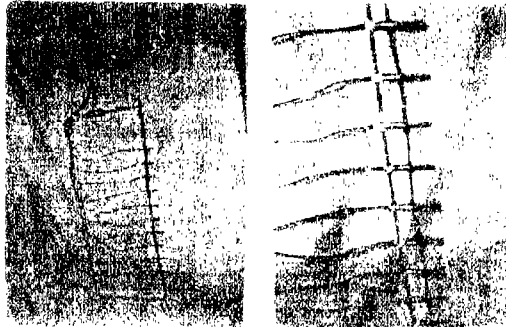


图 2 水听器基阵实物

2 实验原理

2.1 水听器阵元测量自由场的可靠性检验方法原理

在自由球面波声场中,沿球半径方向,声压的振幅值满足关系:

$$P(r) = \frac{A}{r} \quad (1)$$

式中, A 为一常数,其值相当于 $r=1\text{m}$ 处的声压幅值。因此水听器的输出信号幅度在球面波声场中随它离球心的距离成反比衰减。如果水听器所在点受到各种散射声场的影响,则其在声场移动时输出的幅度将会偏离球面波的衰减规律。所以通过水听器阵在球面波声场中移动时,各个阵元输出信号幅度,随着离声源中心距离的变化,而相对球面波传播衰减规律偏离的大小,便可判断基阵架散射场对水听器阵元测量的误差大小。虽然这里是用声压幅度的衰减曲线来描述声场的衰减规律,但事实上散射声叠加于自由场中任一点声压上时,由于相位差的不同,其合成声压幅值也会很灵敏反应。

对 (1) 式还可以取对数,得到声压级随距离对数值的关系:

$$\begin{aligned} SL_p &= 20 \log \frac{p(r)}{P_0} \\ &= 20 \log \frac{A}{P_0 r_0} - 20 \log \frac{r}{r_0} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $P_0 = 1\mu\text{Pa}$, $r_0 = 1\text{m}$ 。

由式 (2) 可见,右边第一项为常数,它表

示声源强度等于离源中心 1m 处的声压级。显见, 在声压和距离的双对数坐标系统中, (2) 式为一直线, 并且距离每增加一倍, 声压级减少 6dB。

从理论上讲, 均匀小球声源辐射出球面波, 所以实验用一个 (直径 50mm) 球形发射换能器作为声源。发射脉冲声信号, 信号载波频率为 5kHz。为了检验此球辐射的声场, 先用一标准水听器, 沿其半径方向移动以实测其声压的实际传播规律。

2.2 声传播衰减曲线的测量

将标准水听器或接收阵装在带有距离刻度的扫描基阵架上。测量仪器联接见图 3。

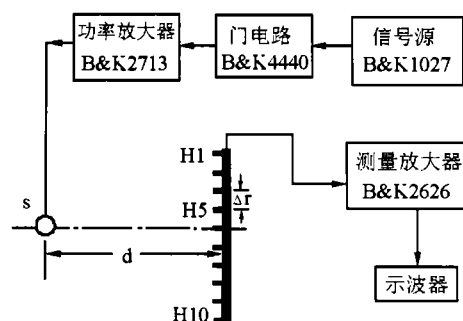


图 3 测量仪器联接方框图

测量时, 由信号源 S 发出 5kHz 的正弦信号, 经功率放大器和门限器产生放大的单频脉冲信号送入发射换能器发出载频脉冲声波, 其脉冲宽度 $\tau = 5\text{ms}$ 以保证反射信号和直达波信号能够隔离。声波由标准水听器或接收基阵上各个水听器接收。标准水听器测量时, 水听器与声源保持同深; 接收阵测量时, 把五号水听器正对发射换能器 S, 并与它保持同深。其余 1-4 号位于五号正上方, 而 6-10 号处于正下方, 如图 3 所示。水听器的输出送到测量放大器放大后, 利用测量放大器“脉冲保持”功能, 可以直接读取接收信号脉冲峰的分贝值, 同时还从示波器上读取放大后的直达脉冲电压峰值。前者读数方便, 后者可以区分直达脉冲和反射脉冲, 排除池壁反射波影响。所以可以进行相互检验, 以便进行修正处理。当水听器

应用声学

移到每个测点位置时, 同时读取它们输出的测量值。

2.3 收发之间距离的声中心修正方法

事实上, 水面读取的水听器和发射球心之间的距离往往和水中它们之间实际距离有较大偏差, 特别是在极近距离处, 相对误差很大。

为了修正水下标准水听器和球声源中心的实际距离和水面读数的偏差, 首先对所选用的发射换能器进行有效声中心的测量。有效声中心的定义为^[2]: 对于一个发射换能器, 在其辐射声波的远场中指定方向上某处的声压与换能器上或附近某一位置的点声源产生在该处的声压 (幅值和相位) 相等, 则该点声源的位置就是此发射换能器的有效声中心。

其测定方法是利用自由场球面波的传播规律^[2]。设 Δd 为由发射换能器几何对称中心或某指定中心量起的距离 d (即水面上测量的接收点到球形声源中心点的距离) 与由有效声中心量起的距离 d' 间的偏差, 则由式 (1) 得声场中某处的声压为:

$$P_d = A/d' = A/(d - \Delta d) \quad (3)$$

上式可写成:

$$A/P_d = d - \Delta d \quad (4)$$

若以 A/P_d 为纵坐标, d 为横坐标, 则在直角坐标中, 式 (4) 为一直线, 并且 Δd 为 d 轴上的截距 (见图 4), 由于所得直线在 d 轴上的截距与常数 A 无关, 所以只要测量过程中, 保持声源工作稳定不变, A 为常数, 就可以确定发射换能器有效声中心位置相对指定中心位置的偏差 Δd 。

在实际测量时, 由于考虑到各种误差影响, $1/P_d$ 和 d 之间关系曲线采用了最小均方误差的方法取得^[3]。设拟合直线的表达式为

$$y = A/P_d = kd + b \quad (5)$$

式中, k , b 为待定值。当 d 分别取不同值时, 取测得对应点的 y'_i 值 ($i = 1, 2, \dots, n$), 则

n 个测量点的值, 相对拟合曲线上值的均方偏差为

$$\delta^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (kd_i + b - y'_i)^2 \quad (6)$$

使上式值最小, 要求: $\frac{\partial \delta^2}{\partial k} = 0$, $\frac{\partial \delta^2}{\partial b} = 0$, 由此可得两个独立方程:

$$\begin{cases} k \sum_{i=1}^n d_i^2 + nb \sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n d_i y'_i \\ k \sum_{i=1}^n d_i + nb = \sum_{i=1}^n y'_i \end{cases} \quad (7)$$

从而解得:

$$\begin{cases} k = \frac{n \sum_{i=1}^n d_i y'_i - \sum_{i=1}^n d_i \sum_{i=1}^n y'_i}{n \sum_{i=1}^n d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n y'_i - k \sum_{i=1}^n d_i}{n} \end{cases} \quad (8)$$

通过上述公式可以很快求出拟合直线在 d 轴上的交点和曲线的斜率。当描绘声压级分贝数与对数距离间的关系时, 应将声中心修正后的声源与接收点的真正收发距离来绘出接收水听器测量的传播衰减曲线。

当确认球形声源的自由声场为球面波声场之后, 便可用此法在此声场中, 利用接收阵上每个水听器测量的声传播衰减曲线。从测得的拟合曲线形式观察满足球面波规律的最近收发距离。用此距离作为接收阵进行全息测量时离源面最近距离的限制。

3 实验数据与分析

根据以上所说的实验方法, 首先用标准水听器进行了辐射声源 S 球面波声场的检查。根据示波器上直达脉冲峰读出线性值取其倒数, 画出其输出随距离变化的曲线图, 见图 5。由图 5 可见, 它接近于一直线, 这表明标准水听器测得的声传播衰减曲线满足球面波的规律, 由曲线还可得到实际上声中心和水面支架上发

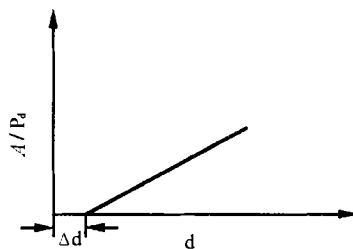


图 4 中心位置的偏差 Δd

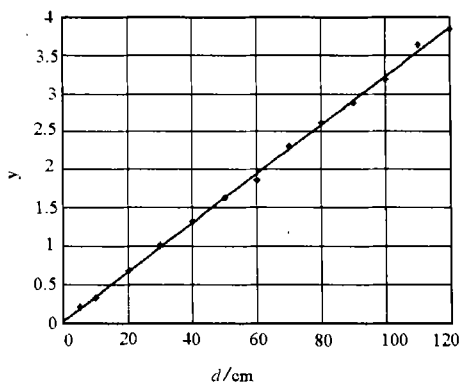


图 5 求声源的有效声中心 (x 轴: 距离 (cm); y 轴: 声压峰值的倒数)

射器 S 的标定位置差只有 1.1cm。经过用声中心修正, 确认了 S 源辐射声场自 0.03m 到 1m 都是良好的球面波声场。

然后, 以水听器阵放置在距离源点 5cm 处 (这是扫描支架上接收器悬挂位置的刻度值与悬吊小球源 S 悬挂位置的差值) 开始测量其接收值。

由于本实验是以五号水听器和声源 S 同深的, 当它进行水平移动时, 各号水听器接收中心离声源的实际距离为:

$$d_i = \sqrt{d^2 + [(i-5) \times \Delta r]^2} \quad (i = 1, 2, \dots, 10 \quad \Delta r = 0.06\text{m}) \quad (9)$$

d 为五号水听器与声源的实读距离。见图 3 所示。以五号水听器对声源进行检查, 根据直达波脉冲的峰值倒数测绘传播直线, 得出其声中心偏差值 $\Delta d = 0.03\text{m}$, 则式 (9) 中应以 $d' = d - 0.03\text{m}$, 取代 d 以修正水面支架上的

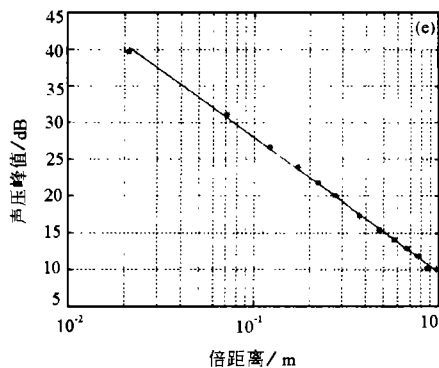
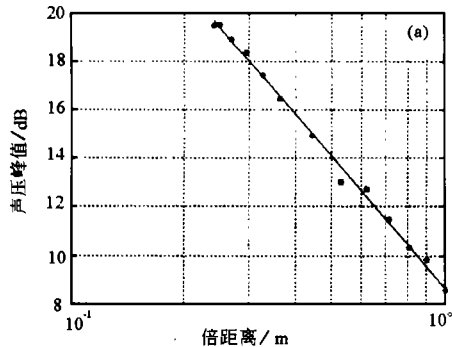


图 6 1-5 号水听器声压传播衰减曲线
(x 轴: 声压峰值 /dB ; y 轴: 倍距离 /m)

位置读数的误差。

$$d'_i = \sqrt{(d - 0.03)^2 + [(i - 5) \times \Delta r]^2}$$

$$(i = 1, 2, \dots, 10 \quad \Delta r = 0.06\text{m}) \quad (10)$$

基阵各水听器声接收的测量结果如表 1 所示, 表中输出数据不是水听器的实际距离点处的声压, 将 d 代入式 (10) 则该数据足以给出可靠的 i 号水听器测量的声压分贝值随真实距离 d'_i 的传播衰减曲线。

在计算机上, 运用软件 Matlab 对各组数据进行最小均方近似直线拟合, 可得出基阵上各个阵元测得的声压传播衰减曲线, 典型曲线见图 6(a-e)。图中的坐标位置按式 (10) 计算出来的距离, 它已经进行了有效声中心修正。

各个水听器阵元所测得的声传播衰减曲线都接近于直线, 它们测得的每倍距离传播衰减量见表 2。由表可见, 5 号水听器 (与发射球的中心同深度的水听器) 所测传播衰减曲线和球面波衰减规律很好的一致, 甚至于在极近场 $r = 2\text{cm}$ 处, 它相当于 5kHz 对应波长 30cm 的 $1/15$ 。明显地, 与声源深度相差不大的水听器的测量曲线也都和球面波衰减规律相近。所以用这个接收阵作为近场测量基阵是合适的。少数水听器测得的传播衰减直线的倍距离衰减量与理想球面波 $-6\text{dB}/\text{倍距离}$ 值相差稍大, 其值为 $-5.1\text{dB}/\text{每倍距离}$ 。从示波器看出, 较远

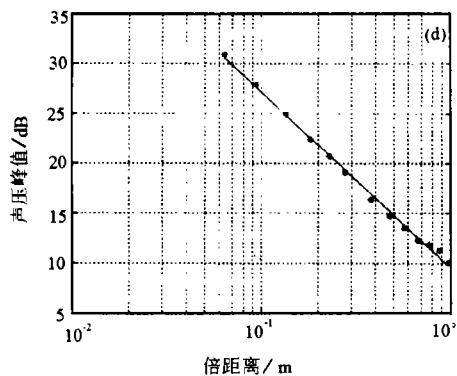
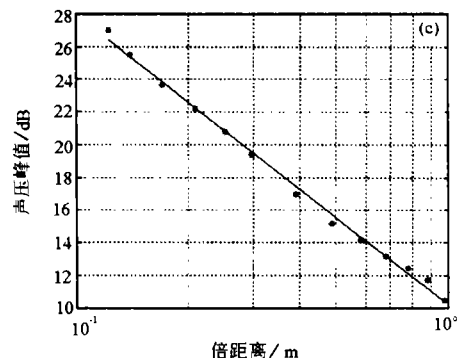
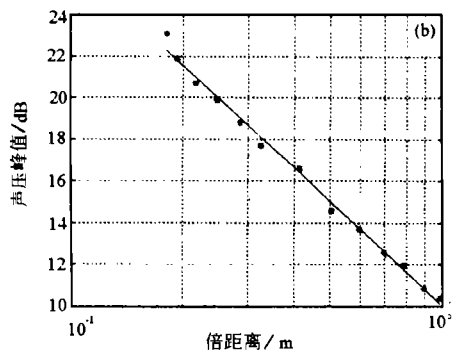


表 1 各号水听器在不同位置处所测值

序号		距离 $d(\text{m})$						
		0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40
1号	测放读数 (dB)	19.48	19.70	18.93	18.36	17.41	16.43	14.74
	示波器读数 (V)							
2号	测放读数 (dB)	23.13	21.88	20.74	19.86	18.83	17.70	15.63
	示波器读数 (V)							
3号	测放读数 (dB)	27.00	25.50	23.68	22.19	20.80	19.40	16.98
	示波器读数 (V)							
4号	测放读数 (dB)	30.90	27.91	24.95	22.41	20.75	19.11	16.38
	示波器读数 (V)							
5号	测放读数 (dB)	39.70	31.09	26.70	23.95	21.80	20.10	17.33
	示波器读数 (V)	85.38	31.80	19.43	13.84	10.74	8.69	6.19
6号	测放读数 (dB)	33.88	29.63	25.98	23.63	21.59	19.95	17.02
	示波器读数 (V)							
7号	测放读数 (dB)	27.60	26.01	23.95	22.33	20.85	19.18	16.38
	示波器读数 (V)							
8号	测放读数 (dB)	23.80	23.10	21.66	21.16	19.71	18.23	16.20
	示波器读数 (V)							
9号	测放读数 (dB)	20.03	19.62	18.70	18.18	17.48	16.40	15.39
	示波器读数 (V)							
10号	测放读数 (dB)	20.75	20.38	19.73	19.11	18.03	17.28	16.18
	示波器读数 (V)							

序号		距离 $d(\text{m})$					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
1号	测放读数 (dB)	13.01	12.70	11.48	11.23	9.85	9.70
	示波器读数 (V)				(2.58)	(2.28)	(2.1)
2号	测放读数 (dB)	13.98	13.68	12.59	11.99	10.90	10.40
	示波器读数 (V)				(2.88)	(2.44)	(2.33)
3号	测放读数 (dB)	15.18	14.15	13.18	12.24	11.78	11.15
	示波器读数 (V)				(3.30)	(2.81)	(2.63)
4号	测放读数 (dB)	14.70	13.54	12.34	11.85	11.26	11.30
	示波器读数 (V)				(2.98)	(2.63)	(2.45)
5号	测放读数 (dB)	15.38	14.05	12.91	12.33	11.85	12.10
	示波器读数 (V)	4.75	4.06	3.57	3.14	2.61	2.59
6号	测放读数 (dB)	15.05	14.03	13.03	12.55	11.25	11.55
	示波器读数 (V)				(3.03)	(2.54)	(2.50)
7号	测放读数 (dB)	14.96	14.13	13.14	12.56	11.06	11.00
	示波器读数 (V)				(3.06)	(2.63)	(2.55)
8号	测放读数 (dB)	14.80	13.63	12.78	12.66	10.98	10.85
	示波器读数 (V)				(3.00)	(2.53)	(2.45)
9号	测放读数 (dB)	14.08	13.40	12.15	12.11	11.13	11.45
	示波器读数 (V)				(2.84)	(2.46)	(2.38)
10号	测放读数 (dB)	14.11	13.11	12.09	11.79	10.75	10.75
	示波器读数 (V)				(2.88)	(2.46)	(2.43)

注：示波器显示的为直达脉冲峰值电压。

表 2 各号水听器测得声传播每倍距离的衰减量

水听器序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dB/ 倍距离	-5.33	-5.10	-5.33	-5.30	-5.50	-5.83	5.54	5.36	-5.14	-5.33

距离处水听器接收信号中, 池壁反射波很强, 甚至高于直达波, 因此用放大器“脉冲保持”直接读数产生较大的误差, 尽管按示波器直达脉冲峰值进行修正, 也仍然影响最终结果。另外, 这次对于球形声源垂直指向性尚未做进一步检查。但是不管怎样, 新设计研制的水听器阵比过去用有机玻璃板作为支架障板, 近场处散射影响是大大减小了。

4 结论

本文描述了所研制的用于近场扫描测量的线列水听器阵中阵元自由场声压测量值的可靠性, 得到结论如下:

(1) 极近场测量用的水听器阵设计研制的关键问题之一是: 既要使阵的支架具有相当的刚度以保证基阵阵元位置、间距不变, 同时又要减小阵元支架和阵元之间互散射作用的影响, 以确保接收阵元测量场点声压的可靠性;

(2) 采用线列阵在球面波声场中移动时, 阵元水听器测量声波传播衰减曲线与理想球面波声场中声传播衰减规律对比, 从而判断基阵的障板、支架以及电缆散射影响的方法, 是可行的;

(3) 通过接收水听器测出的传播衰减曲线, 确定球形声源的等效声中心值, 从而使水听器到声源之间的实际距离可以得到修正。用修正距离描绘的声传播衰减曲线和球面波的衰减曲线对比更可靠, 特别是在极近场范围内。由实际距离的传播衰减曲线可以判断水听器可

使用的最近距离;

(4) 对新研制的 10 元水听器线阵极近场 5cm-100cm 范围内各水听器测得的传播衰减曲线在 (-5.1 到 -5.83) dB/ 倍距离范围内作直线衰减, 表明此线阵适用于实验室水池极近场 ($d > \lambda/7$) 内声压测量;

利用此设备, 1998 年 12 月在沈阳辽海机械厂水池中对长宽 1m 左右的平面阵和 1m 直径的圆柱面阵进行了近场声全息测量和场的全息变换应用研究, 对两种大型基阵的辐射特性和散射特性的预报取得良好结果^[4,5]。这表明实验测量数据可靠, 实验测量线阵性能良好。

(5) 适用于外场湖上使用的极近场扫描水听器阵尚需在现研制的水听器阵的研究经验基础上考虑进一步提高其机械强度。同时, 还应提高加工精度。

致谢 参加实验工作的还有谭福满高级工程师, 另外水听器阵元的研制加工得到 715 所贾友娣、沈建新等同志相助, 在此统表诚挚的谢意。

参 考 文 献

- 1 衣云峰, 何祚镛. 14 元双水听器线列阵声压测量误差的实验研究. 中国船舶科技报告 CK-03139, 哈尔滨工程大学, 1994.
- 2 国家标准《声学—水声换能器测量》GB7965-87.
- 3 冯师颜. 误差理论与实验数据处理. 科学出版社, 1964.
- 4 暴雪梅, 何祚镛. 散射场近声全息方法的实验研究. 中国船舶科技报告, 哈尔滨工程大学, 1999 年 1 月.
- 5 Bao Xuemei, He Zuoyong. *Chinese Journal of Acoustics*, 2000, 19(1).
暴雪梅, 何祚镛. 声学学报, 2000, 25(3).